Mesure de la conductivité capillaire des sols (*)

(*Cas des faibles tensions*) (II)

par

L. Sine et A. Bentz

1. Introduction.

Les résultats obtenus avec l'appareil de Butijn et Wesseling modifié (2, 4) font apparaître une série de contradictions entre résultats expérimentaux et lois définissant la diffusivité capillaire. Ces contradictions nous ont amenés à émettre de nouvelles hypothèses concernant la définition de certaines conditions d'écoulement en milieux non saturés.

Pour vérifier ces nouvelles hypothèses, nous avons mesuré l'évolution de profils hydriques à partir d'un appareil utilisant les rayons gamma, décrit ailleurs [1].

L'article ci-après renseigne l'évolution des profils hydriques dans un échantillon soumis à deux types d'expériences :

1) La mesure de la conductivité capillaire par la méthode de Gardner [3].

2) Le rabattement, par degrés, d'une nappe phréatique.

2. Caractéristiques de matériel utilisé.

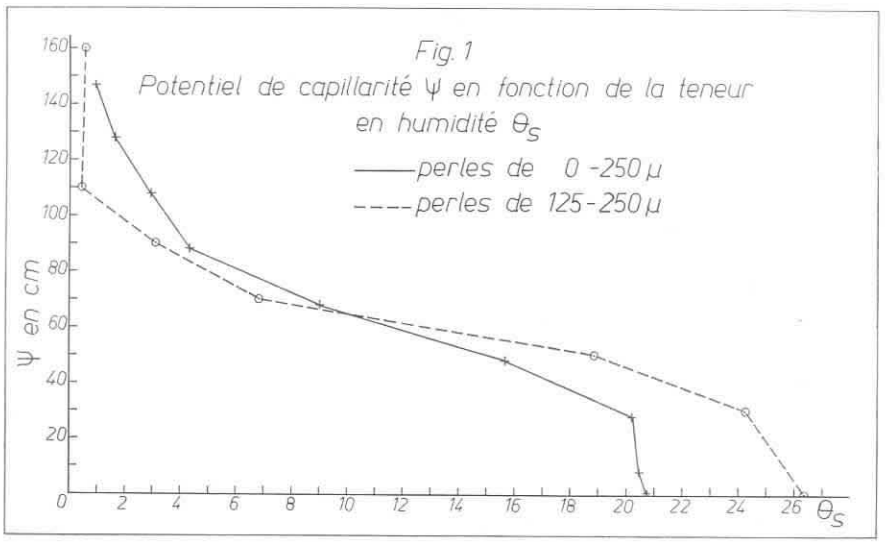
Le matériel utilisé se compose de perles de verre dont la granulométrie est la suivante :

Diamètre des particules en microns	Pourcentage
250 — 200	4,2
200 — 100	84,8
< 100	11,0

(*) Déposé à la rédaction le 29 juillet 1965.

Ce matériel est légèrement différent de celui utilisé précédemment [4] dans lequel les particules avaient des diamètres variant de 125 à 250 microns.

La Fig. 1 représente la courbe des tensions Ψ en fonction des teneurs en humidité pondérales θ_s, obtenue lors d'un processus de dessèchement. A titre de comparaison, nous avons reporté la courbe obtenue avec les perles utilisées précédemment [4].



Les observations sont effectuées sur des échantillons cylindriques d'un diamètre de 7,4 cm et d'une hauteur de 15 cm ou de 123 cm.

Le poids spécifique apparent sec est de 1,49 g/cm³ pour les échantillons de 15 cm et de 1,50 g/cm³ pour ceux de 123 cm. Le poids spécifique réel du matériau est de 2,47 g/cm³. Le coefficient de conductivité hydraulique vaut 10,5 m jour^{-1}.

Lors de l'expérience relative à la méthode de GARDNER, l'échantillon repose sur une plaque poreuse dont la conductivité hydraulique est de 0,18 m jour^{-1}. Son épaisseur vaut 2 cm.

3. Échantillon reposant sur une plaque poreuse.

Rappelons que, dans la méthode de GARDNER, l'échantillon reposant sur une plaque poreuse saturée, en équilibre à une tension Ψ_i subit à l'instant $t = 0$, un accroissement de tension $\Psi_f - \Psi_i$. L'évolution du débit de drainage de l'échantillon caractérise la conductivité capillaire.

On utilise les relations suivantes :

$$\frac{\theta - \theta_f}{\theta_i - \theta_f} = 2 \sum_{n=1,2,\ldots}^{\infty} \frac{\cos\left[\alpha_n \left(1 - \frac{s}{L}\right)\right] e^{-\frac{\alpha_n^2 Dt}{L^2}}}{\alpha_n \sin \alpha_n \left(a + \operatorname{cosec}^2 \alpha_n\right)} \quad (1)$$

$$1 - \frac{Q_t}{Qf} = \sum_{n=1,2,\ldots}^{\infty} A_n \, e^{-\alpha_n^2 a^2 y^2} \quad (2)$$

dans lesquelles :

θ_i : teneur en humidité initiale,
θ_f : teneur en humidité finale,
θ : teneur en humidité au temps t, en un point d'abscisse s,
α_n : $n^{\text{ième}}$ racine de l'équation
$$a\alpha_n \operatorname{tg}\alpha_n = 1,$$
a : $\frac{K}{L} \cdot \frac{L_m}{K_m}$,
K : conductivité capillaire de l'échantillon,
L : hauteur de l'échantillon,
K_m : conductivité hydraulique de la plaque poreuse saturée,
L_m : épaisseur de la plaque poreuse,
s : altitude de la section considérée, comptée par rapport à la face supérieure de la plaque poreuse,
D : coefficient de diffusivité capillaire,
An : $\frac{2}{\alpha_n^2 \left(a + \operatorname{cosec}^2 \alpha_n\right)} = \frac{2}{a^2 \alpha_n^2 \left(\alpha_n^2 + 1/a + 1/a^2\right)}$,
y : $\frac{\sqrt{Dt}}{aL}$,
Q_t : quantité d'eau écoulée au temps t,
Q_f : quantité totale d'eau écoulée,

La fig. 2 représente, dans le cas où l'impédance $\left(\frac{L_m}{K_m}\right)$ est infinie, l'évolution de $\frac{\theta - \theta_f}{\theta_i - \theta_f}$ en fonction de $\frac{Dt}{L^2}$, et de $\frac{s}{L}$, (équation 1).

Nous avons émis l'hypothèse que les lois (1) et (2), dans le cas d'une impédance infinie devaient être remplacées par les expressions suivantes :

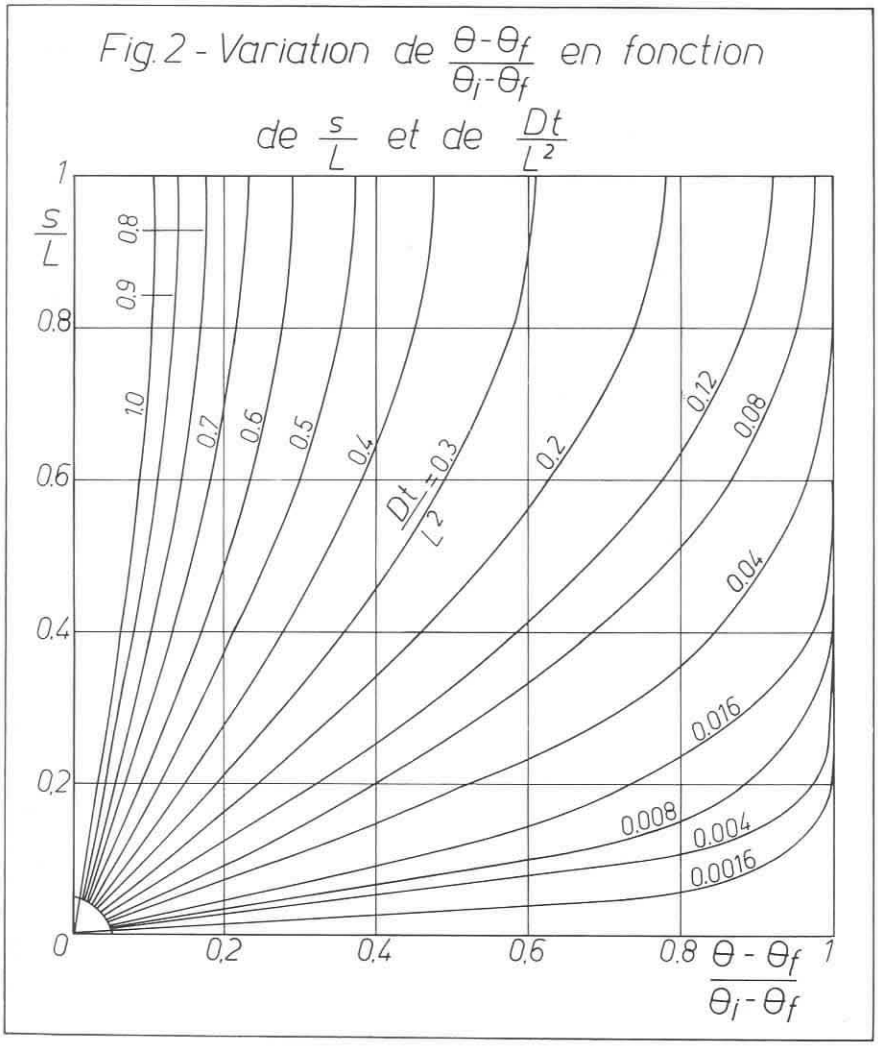
$$\frac{\theta - \theta_f}{\theta_i - \theta_f} = e^{-\frac{DUt}{s}} \quad (3)$$

$$1 - \frac{Q_t}{Qf} = \frac{D\,Ut}{L} \int_{\frac{D\,Ut}{L}}^{\infty} e^{-v}\,dv \qquad (4)$$

dans lesquelles, outre les notations précédentes :

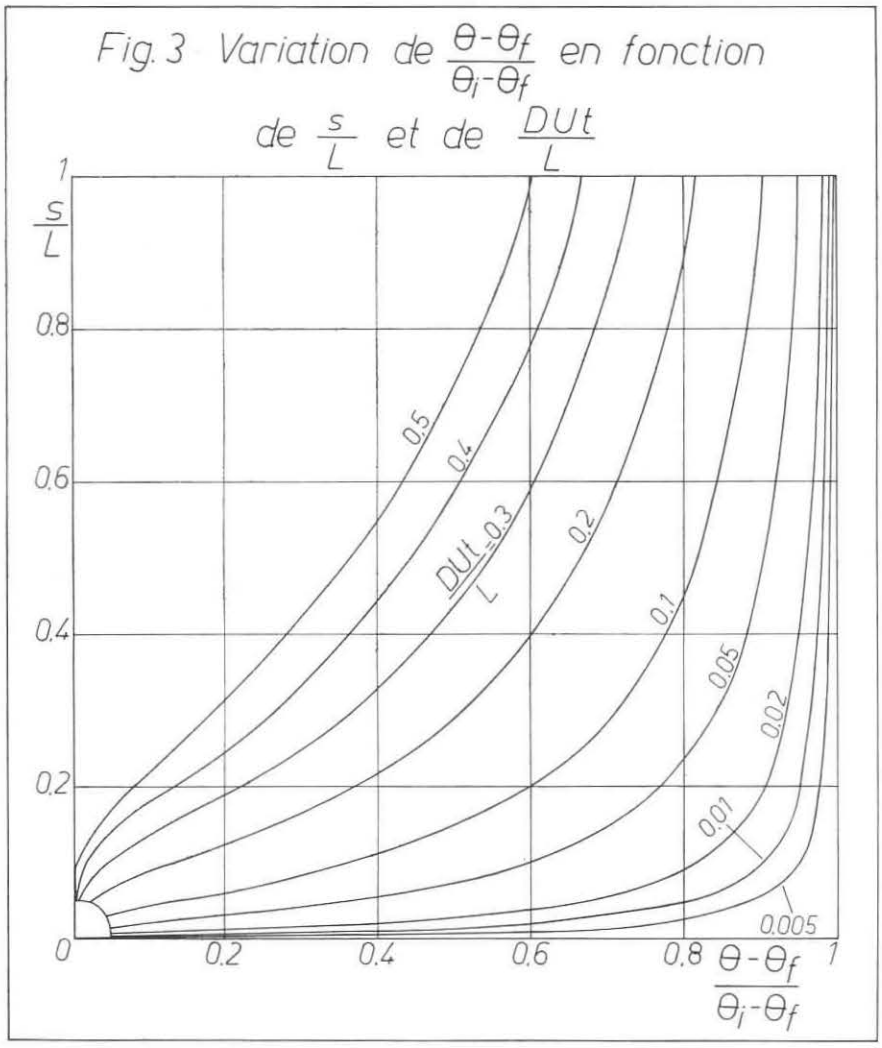
— U est une fonction de la teneur en humidité et représente la surface spécifique du volume d'air de l'échantillon.

— $v = \frac{D\,Ut}{s}$



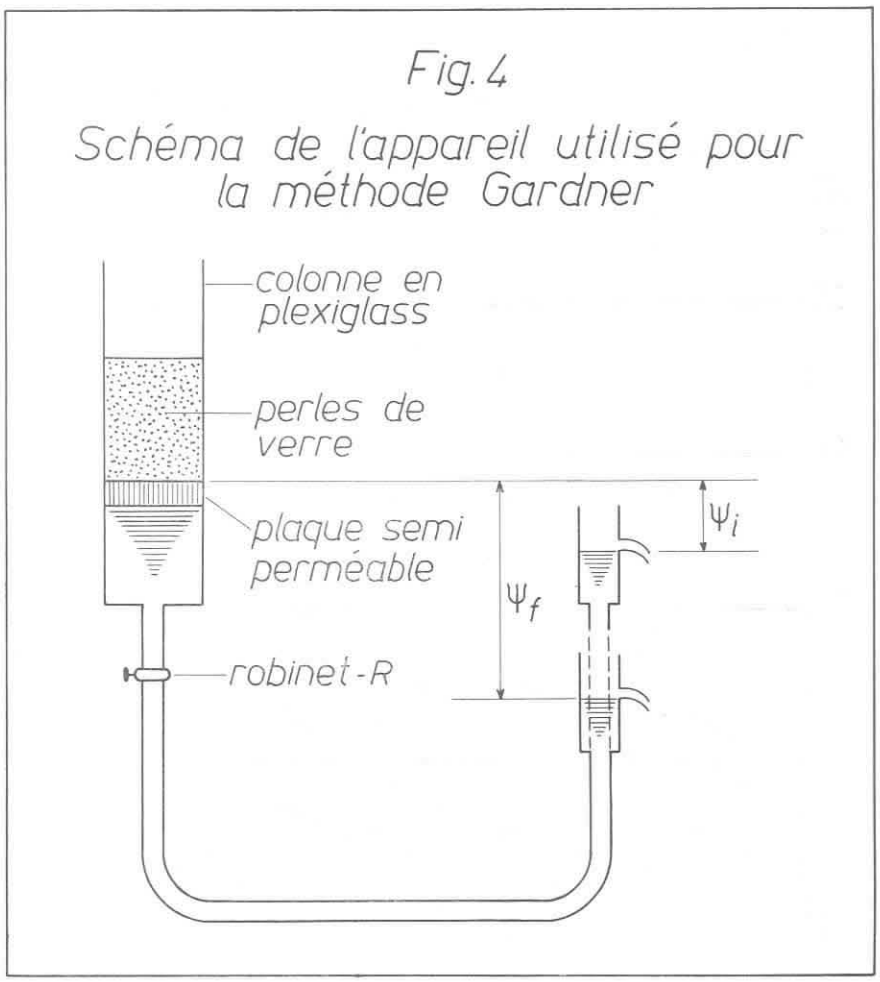
La Fig. 3 traduit graphiquement l'équation (3).

Le but de l'essai est de vérifier si l'évolution des profils hydriques est conforme à l'une des lois (1) ou (3).



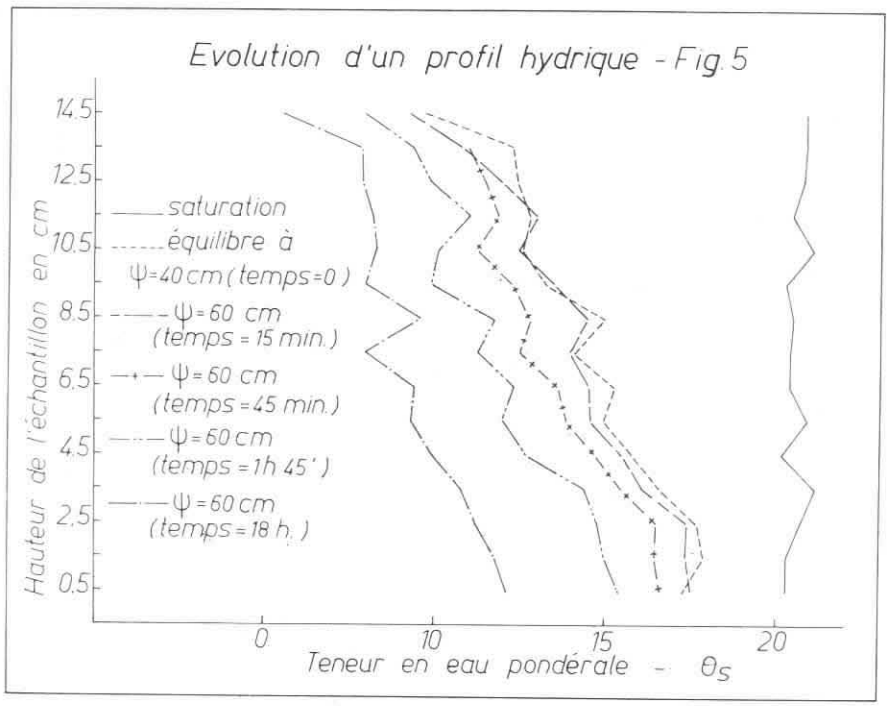
La hauteur L de l'échantillon est de 15 cm et son diamètre est de 7,4 cm. Il a été procédé à 3 répétitions. Le profil hydrique est mesuré de cm en cm au bout de 15 minutes, de 45 minutes, de 105 minutes ainsi qu'à l'équilibre.

Lors de la première expérience, les mesures ont été poursuivies durant des périodes dépassant 44 heures. En raison des variations insignifiantes constatées au bout de 20 heures, nous avons admis, lors des expériences ultérieures, que cette durée correspondait à l'équilibre.

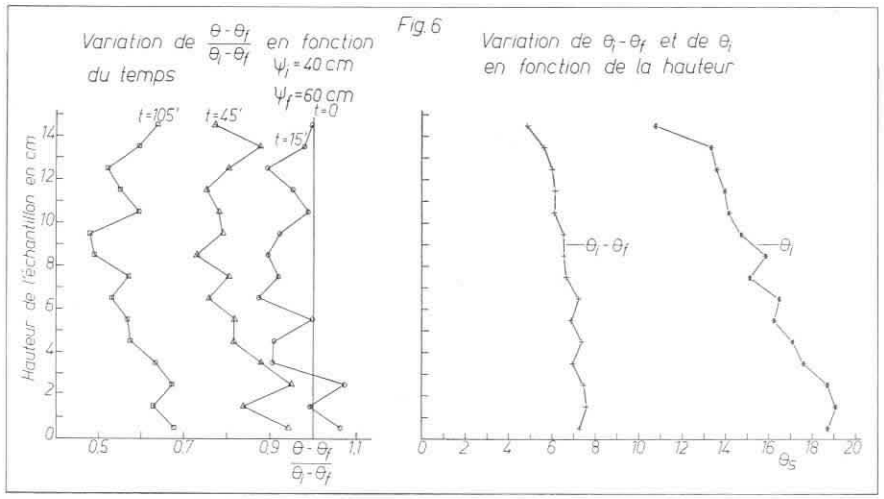


La plaque semi-perméable, est reliée à un réservoir d'eau par un tube en caoutchouc armé. Lors des mesures, cette liaison est interrompue par la fermeture du robinet R. (cfr. Fig. 4). Pour effectuer les déterminations d'humidité, on déplace la colonne devant le faisceau de rayons gamma [1].

La Fig. 5 représente un exemple d'évolution du profil hydrique lorsqu'on passe de $\Psi_i = 40$ cm à $\Psi_f = 60$ cm d'eau.



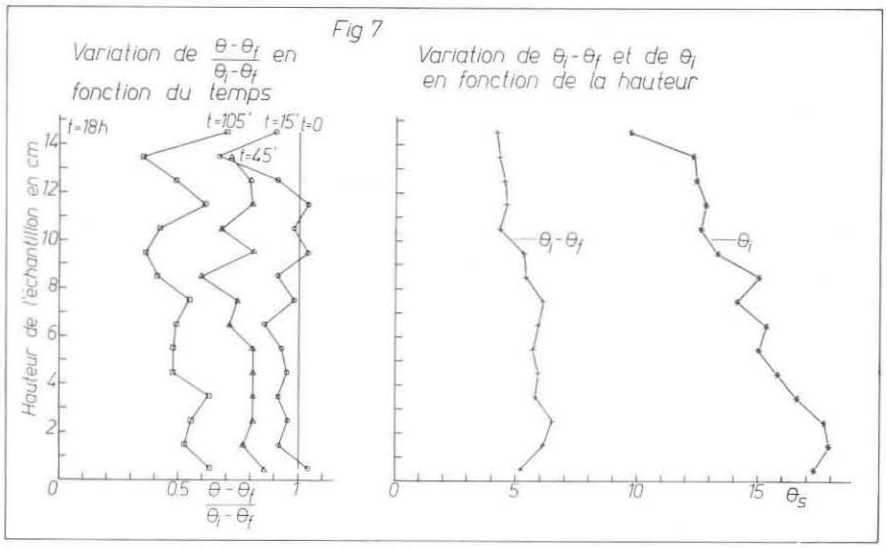
Pour analyser ces résultats, nous calculons l'évolution de la grandeur $\frac{\theta - \theta_f}{\theta_i - \theta_f}$. Un exemple d'évolution est représenté à la Fig. 6.

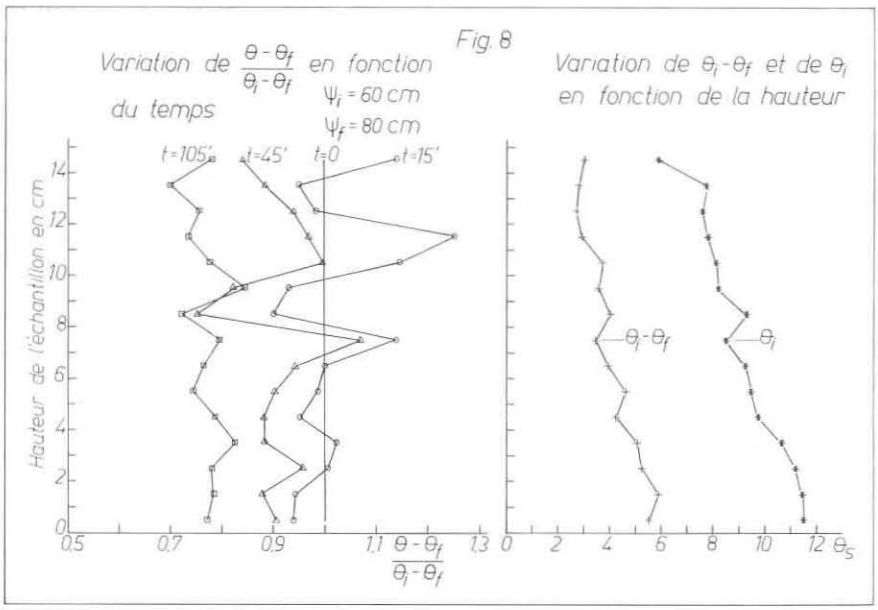


L'examen des résultats montre que le profil hydrique de l'échantillon se déplace parallèlement à lui-même et ce sur toute sa hauteur. Ce fait est en contradiction avec les hypothèses de GARDNER ainsi qu'avec celles proposées par nous-mêmes (cfr. Fig. 2 et Fig. 3).

Ce résultat est constaté d'une façon générale lors de chaque expérimentation.

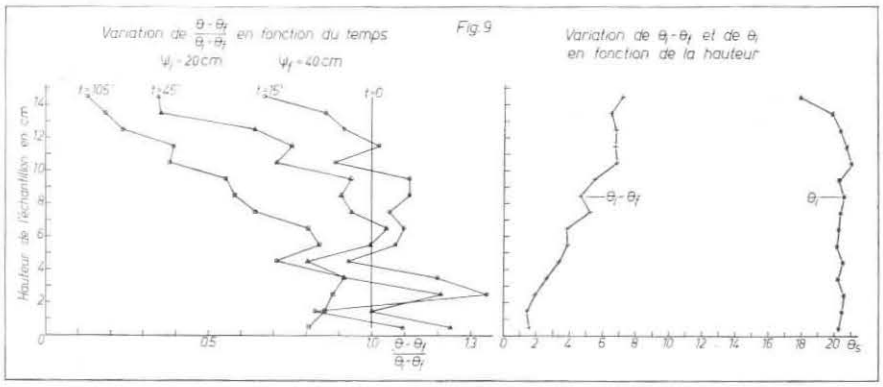
Les Fig. 7 et 8 représentent les valeurs moyennes, au cours de 3 répétitions,





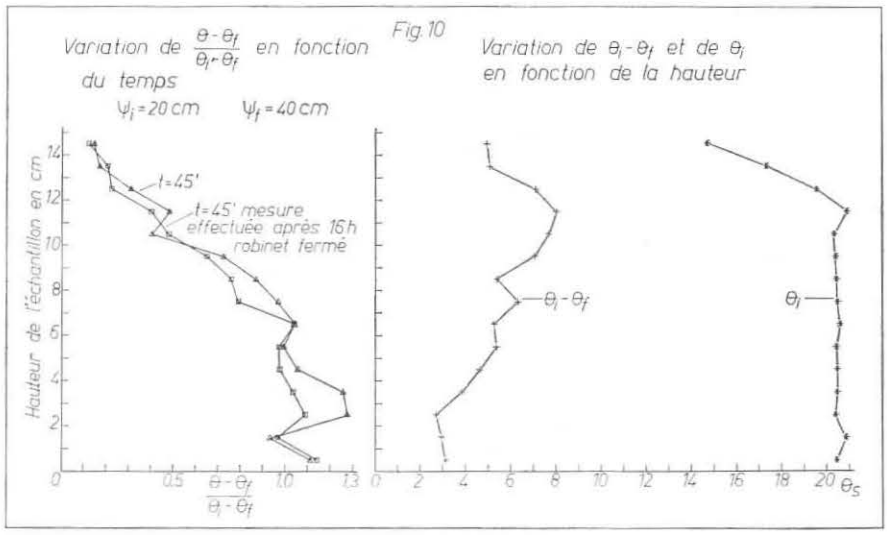
de la variation de $\frac{\theta - \theta_f}{\theta_i - \theta_f}$ en fonction du temps et de l'altitude pour $\Psi_i = 40$ cm et $\Psi_f = 60$ cm ainsi que pour $\Psi_i = 60$ cm et $\Psi_f = 80$ cm d'eau.

L'évolution légèrement différente constatée à la figure 9 est liée à l'allure de la courbe Ψ (θ_s) dans l'intervalle de variation de 0 à 30 cm (cfr. Fig. 1).



On aboutit ainsi à cette importante constatation : « *le mouvement de l'eau en phase liquide dans un milieu non saturé peut s'effectuer en l'absence d'un gradient d'humidité* ».

Signalons encore que l'évolution du profil hydrique est arrêtée par la fermeture du robinet R. Entre deux mesures, décalées de 16 heures et entre lesquelles le robinet est resté fermé, on ne constate pas de différence sensible entre les profils mesurés (cfr. Fig. 10).



Tenant compte de cette remarque, les intervalles de temps signalés sur les graphiques n'incluent pas les durées des mesures (temps durant lesquels le robinet est fermé).

Ces constatations sont en opposition avec la notion même de diffusivité capillaire dans laquelle l'écoulement en milieu non saturé se traduit par la loi :

$$q = - D \frac{d\theta}{dx} \tag{5}$$

dans laquelle :

- q : débit volumétrique dans la direction x, par unité de section, normale à x,
- θ : teneur en humidité du sol exprimée en volume d'eau par volume apparent de sol,
- x : direction et axe d'écoulement,
- D : coefficient de diffusivité capillaire, fonction univoque de la teneur en humidité.

Il est donc nécessaire de trouver une nouvelle formulation pour ces types d'écoulement.

Cette formulation devra vraisemblablement définir les coefficients en fonction des teneurs en humidité et des conditions limites.

4. Evolution du profil hydrique lors du rabattement d'une nappe.

Le système expérimental utilisé est composé d'une colonne de perles de verre d'une hauteur de 123 cm. L'extrémité inférieure est reliée à un réservoir d'eau par un tuyau souple, qui permet de faire varier la position de la nappe (cfr. Fig. 11). Le robinet R est fermé durant les mesures. L'échantillon a une porosité aussi uniforme que possible.

La mesure de l'atténuation du rayonnement gamma au travers des perles sèches fournit le poids spécifique apparent.

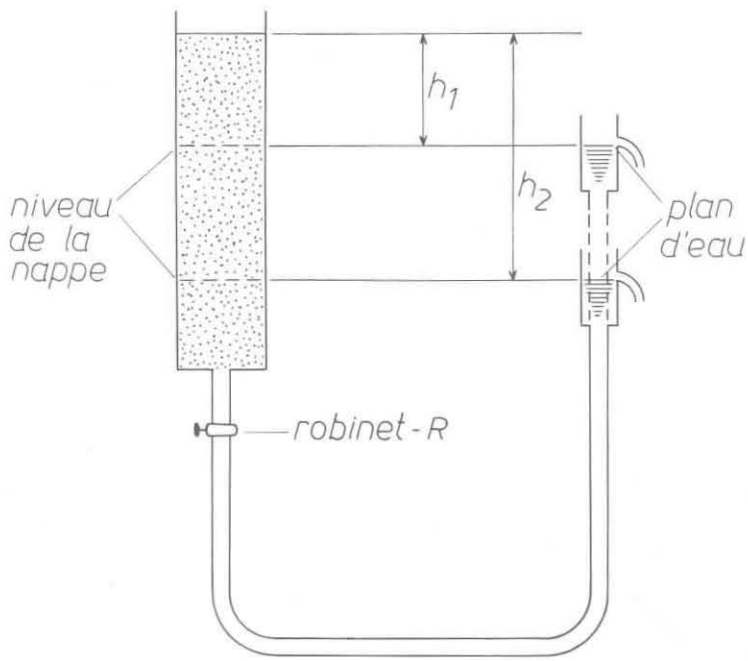
La colonne est lentement saturée par infiltration ascendante et le profil hydrique correspondant est déterminé. Le niveau du plan d'eau est ensuite descendu instantanément, de façon à obtenir à l'instant $t = 0$, $h_1 = 54$ cm.

On ne constate aucune modification sensible du profil hydrique et ce durant plus de 24 heures. On descend ensuite le plan d'eau à la cote $h_2 = 79$ cm. L'évolution du profil hydrique est observée jusqu'à équilibre. On continue les mesures de façon analogue pour h = 104, 124, 144 et 164 cm. A 184 cm, la nappe décroche de l'échantillon. Les pro-

fils hydriques sont observés aux instants suivants : t = 30 minutes, 2 heures 30 minutes, 20 heures et à l'équilibre (temps supérieur à 36 heures). Un exemple de mesure est représenté à la Fig. 12. Pour des raisons de rapidité, le profil est mesuré de 3 en 3 cm dans la zone des fortes variations et de 6 en 6 cm dans la zone des humidités sensiblement constantes.

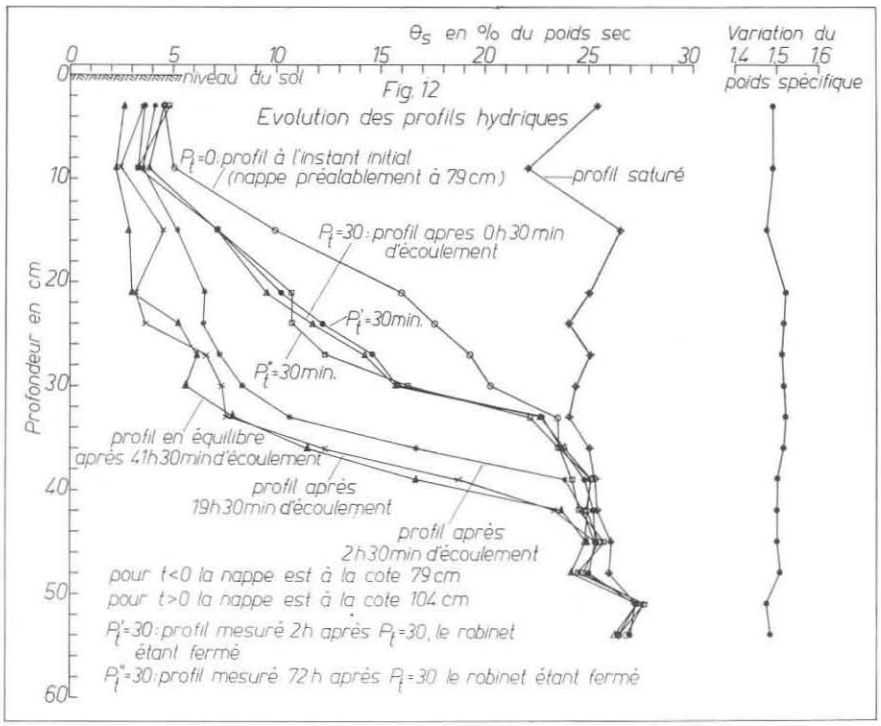
Fig. 11

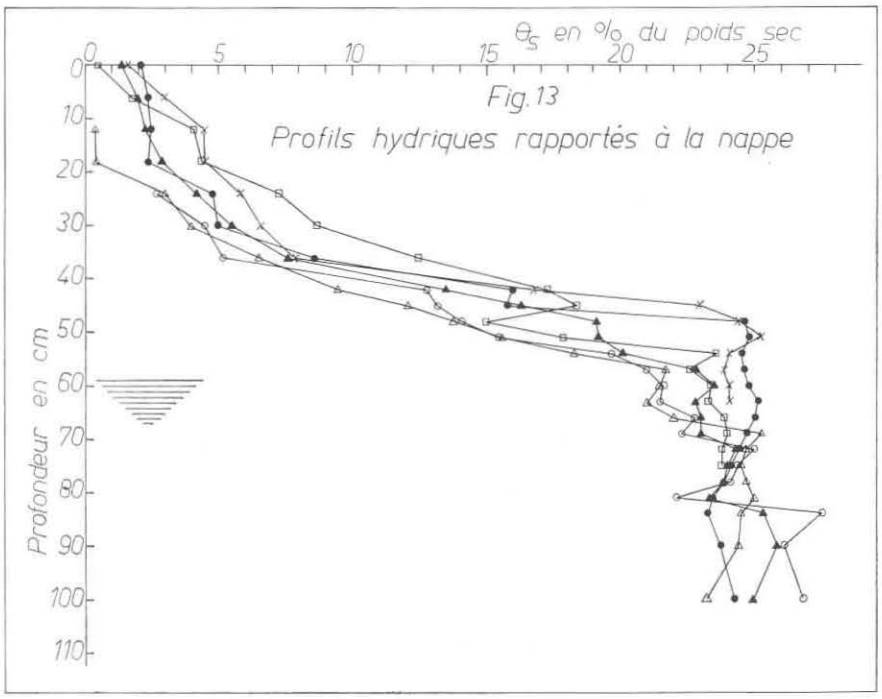
Schéma de l'appareil utilisé pour l'étude de l'évolution du profil au cours du rabattement d'une nappe.

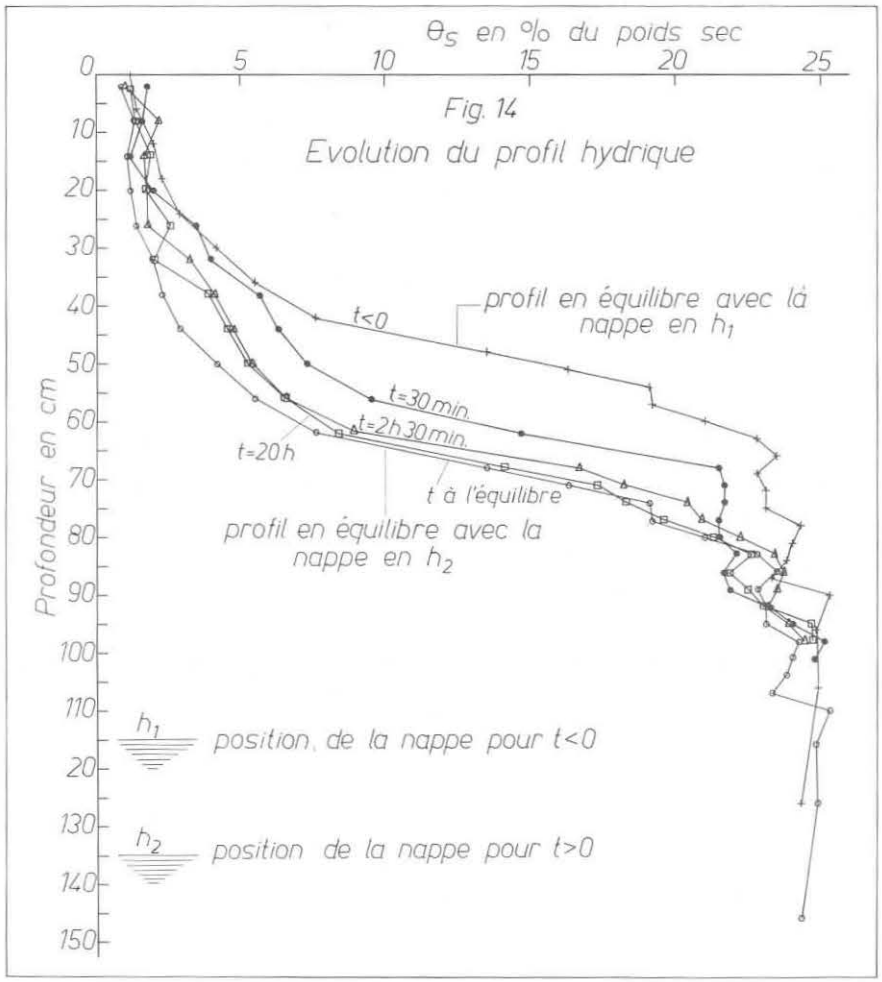


L'examen des résultats permet les conclusions suivantes :

D'une part, on observe que la fermeture du robinet R arrête tout mouvement d'eau à l'intérieur de la colonne de sol. Ce phénomène est en opposition avec la théorie classique de la diffusivité capillaire.


θs en % du poids sec
Variation du poids spécifique
niveau du sol
Fig. 12
Evolution des profils hydriques
Pt=0: profil à l'instant initial (nappe préalablement à 79 cm)
profil saturé
Pt=30: profil apres 0h30min d'écoulement
P't=30min.
P''t=30min.
profil en équilibre après 41h30min d'écoulement
profil après 19h30min d'écoulement
profil après 2h30min d'écoulement
pour t<0 la nappe est à la cote 79 cm
pour t>0 la nappe est à la cote 104 cm
P't=30: profil mesuré 2h après Pt=30, le robinet étant fermé
P''t=30: profil mesuré 72h après Pt=30 le robinet étant fermé
Profondeur en cm


θs en % du poids sec
Fig. 13
Profils hydriques rapportés à la nappe
Profondeur en cm



D'autre part, en reportant dans un diagramme, pour chaque temps d'observation, les profils hydriques mesurés, on constate que :

- la forme des profils d'équilibre est indépendante de la position de la nappe (cfr. Fig. 13).
- entre deux positions d'équilibre, le profil se déplace parallèlement à lui-même (cfr. Fig. 14).

RÉSUMÉ

En mesurant les teneurs en humidité à l'aide de rayons gamma, les auteurs étudient l'évolution des profils hydriques dans un échantillon de perles de verre soumis à l'expérience de Gardner de mesure de la diffusivité capillaire.

Ils constatent que les résultats expérimentaux sont en contradiction avec les hypothèses émises et que le mouvement de l'eau en phase liquide dans un milieu non saturé peut s'effectuer en l'absence de gradient d'humidité.

Étudiant l'évolution du profil hydrique lors du rabattement d'une nappe, ils observent également une évolution de la frange de capillarité en opposition avec la théorie classique de la conductivité capillaire.

BIBLIOGRAPHIE

(1) A. Bentz et A. Massaux, Mesure d'un profil hydrique au moyen de rayons gamma (à paraître).

(2) J. Butijn et J. Wesseling, Détermination of the capillary conductivity of soils at low moisture tensions. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Volume 7 pp. 155-163. 1959.

(3) W. R. Gardner, Calculation of capillary conductivity from pressure outflow data, *Soil Science Society, Proceedings* vol. 20, pp. 317-320. 1956.

(4) L. Sine et A. Bentz, Note sur la mesure de la conductivité capillaire des sols. *Bull. Inst. Agron. et Stat. de Rech. Gbx*, T. XXXI, n° 3, pp. 322-358. 1963.